

铝合金轴心受压构件的稳定性研究与数值模拟

翟希梅, 吴海, 王誉瑾, 范峰

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨, xzmzhai@hit.edu.cn)

摘要: 为了给试验提供可靠的依据与指导, 采用有限元软件 ABAQUS 对 17 根 6082-T6 型高强铝合金轴心受压构件进行数值模拟, 并与试验结果进行对比分析. 对影响有限元计算结果的各项因素, 包括网格划分与尺寸、端板厚度、初弯曲大小和材料参数进行分析. 有限元模型采用完全积分形式的 20 节点实体单元, 铝合金应力应变关系采用 Ramberg-Osgood 模型. 结果显示: 采用三维实体单元 C3D20 进行的数值模拟与试验的屈曲荷载相对误差控制在 12% 以内; 通常的轴向网格尺寸与端板厚度对构件稳定系数的影响可忽略不计, 支座处端板的存在基本不会影响构件的铰支受力状态; 稳定系数随初弯曲幅值的增大而降低, 随材料参数 n 值的增大而提高; 随着名义屈服强度 $f_{0.2}$ 的增大, 构件的屈曲荷载也随之增大, 且增幅在长细比 λ 越小时更为显著.

关键词: 铝合金; 轴压; 数值模拟; 稳定系数; 屈曲

中图分类号: TU395

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)12-0001-06

Stability research and numerical simulation of high-strength aluminum alloy column in compression

ZHAI Xi-mei, WU Hai, WANG Yu-jin, FAN Feng

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, xzmzhai@hit.edu.cn)

Abstract: To provide reliable verification and guidance for experiments, numerical simulations of 17 high-strength aluminum alloy columns in compression were conducted using ABAQUS and the results were compared with experimental results. Factors which influenced simulation results, including meshes size, thickness of end plates, initial imperfection and material properties were analyzed. 3D full integration continuum element C3D20 and Ramberg-Osgood model for stress-strain relationship were adopted in simulation. The simulation results show that the relative errors of buckling load between experiments and simulations are under 12%; the meshes size and thickness of end plates have a negligible influence on stability coefficient, and the existence of end plates rarely influence mechanical properties of specimens with hinge supports; as initial geometric imperfection ascends and the parameter n of aluminum alloy descends, the value of stability coefficient decreases; buckling loads of specimens obviously increases as proof stress $f_{0.2}$ increases, especially for specimens with small slenderness ratio.

Key words: aluminum alloy; compression; numerical simulation; stability coefficient; buckling

铝合金结构的发展始于 20 世纪 30 年代, 以其高强、轻质、耐腐蚀等优点被广泛应用于建筑领域. 但由于铝合金材料弹性模量较低, 因此构件的失稳问题显得尤为突出. 欧洲、美国于 20 世纪 70

年代各自建立了设计规范^[1-2], 目前, 我国刚刚推出铝合金结构设计规范^[3], 然而针对部分型号铝合金的设计大多参考国外规范, 其适用性仍有待研究. 本文利用有限元软件 ABAQUS 对 H 型、箱型截面的 6082-T6 型高强铝合金轴心受压构件进行数值模拟, 并与构件试验结果进行比较, 对影响有限元计算结果的各项因素, 包括网格的划分与尺寸、端板厚度、初弯曲大小和材料参数进行分

收稿日期: 2010-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108126).

作者简介: 翟希梅(1971—), 女, 副教授;

范峰(1971—), 男, 教授, 博士生导师.

2 与试验结果对比

本文针对 H 型、箱型 2 种截面共 17 根试验构件^[11]进行数值模拟.模拟所用构件长度均为实测值,因此对同一种名义尺寸的构件模拟结果略有差异,数值模拟与试验关于屈曲荷载及破坏模式的比较见表 2.模拟结果显示:17 根构件的破坏形式与试验结果一致,全部以整体弯曲失稳为主,其中箱型试件 F1-1、F1-2 和 F1-3 还伴随局部失

稳现象.在数值模拟时,上述 3 个试件的二、三阶失稳模态为局部屈曲,因此在初始缺陷的引入中包括整体与局部屈曲 2 种形式,其中局部屈曲幅值 ω_d 采用 Walker^[12]提出的公式

$$\omega_d = 0.3t\sqrt{\frac{f_{0.2}}{\sigma_{cr}}}.$$

(2)

式中: t 为构件截面厚度, σ_{cr} 为弹性局部屈曲应力,可以通过模态分析得到.

表 2 数值模拟与试验结果屈曲荷载比较

截面	构件 编号	截面尺寸 $h \times b \times t_1 \times t_2$ /mm	长度/ mm	长细比	正则化 长细比	屈曲荷载			破坏模式
						试验 结果/kN	数值 模拟/kN	相对误/%	
H 型	I1-1	120×80×6×8	1040.0	56.96	1.21	311.78	329.27	-5.61	整体弯曲失稳
	I2-1	120×60×5×7	1026.0	78.43	1.66	148.73	137.39	7.63	整体弯曲失稳
	I3-1	100×50×5×7	1014.0	92.50	1.96	89.85	83.50	7.07	整体弯曲失稳
	I3-2	100×50×5×7	1002.0	91.44	1.93	94.58	85.32	9.79	整体弯曲失稳
	I3-3	100×50×5×7	1024.0	93.37	1.98	93.64	82.02	12.41	整体弯曲失稳
	I4-1	100×70×6×8	1018.0	62.94	1.33	240.52	240.82	-0.13	整体弯曲失稳
	I4-2	100×70×6×8	1014.5	62.73	1.33	262.38	242.14	7.72	整体弯曲失稳
	I4-3	100×70×6×8	1022.5	63.21	1.34	263.50	239.15	9.24	整体弯曲失稳
	F1-1	80×80×4×4	1016.0	33.99	0.72	294.77	307.89	-4.45	整体弯曲+局部失稳
箱型	F1-2	80×80×4×4	1021.0	34.15	0.72	289.47	307.54	-6.24	整体弯曲+局部失稳
	F1-3	80×80×4×4	1016.0	33.99	0.72	295.17	307.89	-4.31	整体弯曲+局部失稳
	F2-1	80×40×4×4	1508.5	96.64	2.04	63.80	62.02	2.79	整体弯曲失稳
	F2-2	80×40×4×4	1506.0	96.48	2.04	68.89	62.21	9.70	整体弯曲失稳
	F2-3	80×40×4×4	1509.9	96.72	2.05	63.08	61.91	1.86	整体弯曲失稳
	F3-1	100×50×4×4	1508.0	75.81	1.60	120.69	124.34	-3.02	整体弯曲失稳
	F3-2	100×50×4×4	1509.9	75.90	1.61	127.66	124.05	2.82	整体弯曲失稳
	F3-3	100×50×4×4	1511.5	75.98	1.61	130.07	123.82	4.81	整体弯曲失稳

由表 2 可知,试验与模拟结果关于屈曲荷载的相对误差控制在 12.41% 内.以构件 I3-1 为例,部分测点实测值与数值模拟的位移与应变结果见图 6、7.数值模拟与试验结果的对比说明,两

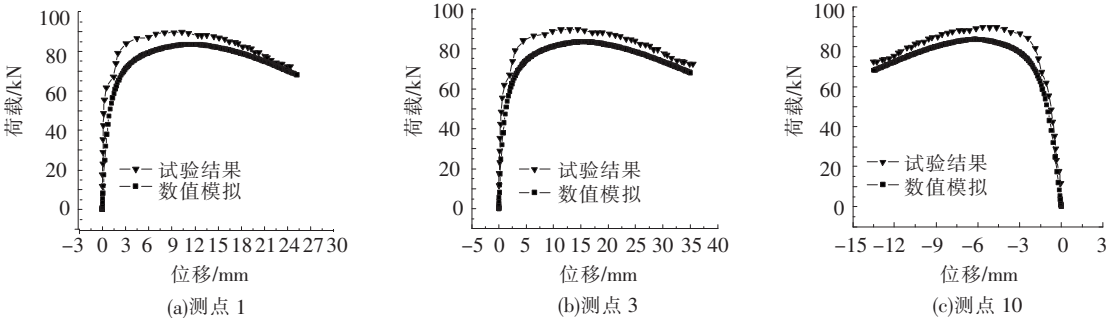


图 6 试件 I3-1 荷载-位移曲线

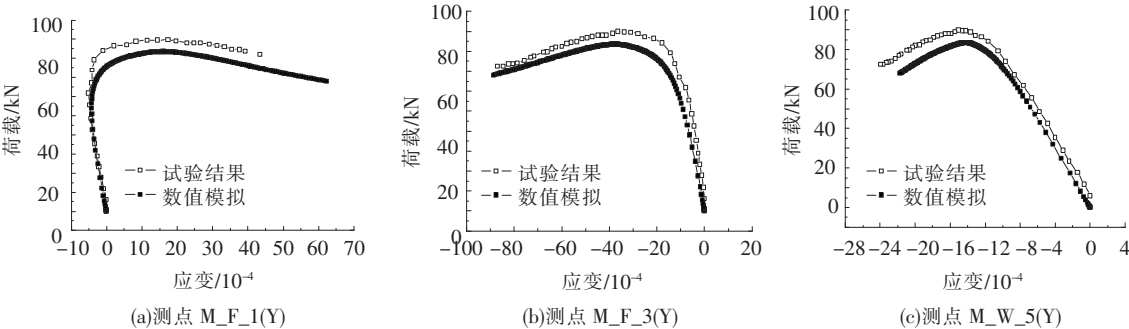


图 7 试件 I3-1 荷载-应变曲线

者在荷载-位移曲线以及试件局部测点的应变变化方面皆显示了良好的一致性,说明本文的铝合金轴压构件的数值模拟在单元选取、参数设置及网格划分等方面是适用的。

3 有限元结果影响因素分析

3.1 网格划分及其尺寸

通常情况下网格尺寸越小,计算精度越高,但机时增加,为此进行了构件及支座端板的网格尺寸敏感性分析。考虑到铝合金构件腹板和翼缘的厚度很小,一般在 10 mm 以内,可将其在腹板和翼缘厚度方向上划分为 2 个单元,同时尽量保证构件横截面内(XZ 平面,见图 8)的单元格为正方形或接近正方形。另外,两端支座处端板上位于构件截面之外的网格对结果影响很小,可以采用较粗糙网格。为确定构件沿轴向(Y 向)的网格尺寸,进行了稳定系数 ϕ 对网格尺寸的敏感性分析,稳定系数的计算公式为

$$\phi = N / (f_{0.2} \cdot A). \quad (3)$$

式中: N 、 $f_{0.2}$ 、 A 分别为屈曲荷载、名义屈服强度、构件截面面积。

针对 4 种不同的长细比构件,沿构件轴向(Y 向)的网格尺寸分别按 10、20、30、40、50 mm 计算了构件的稳定系数,结果见图 9。构件稳定系数结果几乎不受轴向网格尺寸的影响,所有相对误差控制在 0.05% 以内。为减少计算时间,本文轴向网格尺寸采用 50 mm。

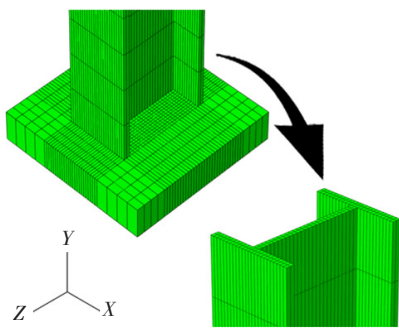


图 8 有限元模型网格的划分

3.2 端板厚度

试验中通过石膏将构件固定在钢槽内,而在有限元模拟时将石膏与钢槽底板共同简化为钢材质的端板。试验中采用的钢槽底板与石膏的总厚度一般在 40 mm 左右,本文分析了上下刀口间距保持不变,但端板厚度分别为 0、10、20、30、40 mm 5 种情况对 ϕ 的影响,结果见图 10,其中端板厚度为 0 意味着理想铰支状态,可以看到,不同正则化长细比下数值模拟结果几乎不受端板厚度的影

响,相对误差控制在 0.8% 以内,说明试验时采用的单向铰支座方法能够保证试件接近理想铰支状态,不会带来较大误差。

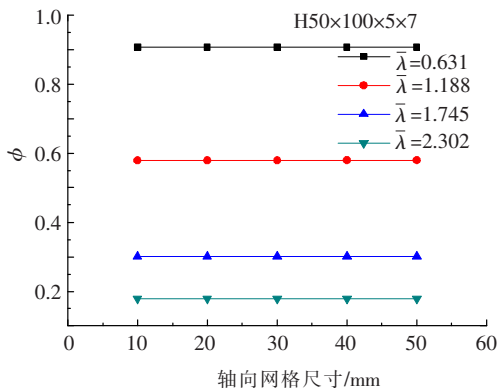


图 9 轴向网格尺寸对稳定系数的影响

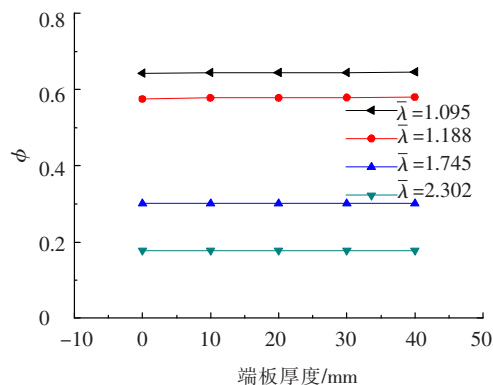


图 10 端板厚度对稳定系数的影响

3.3 初弯曲大小

国内外规范针对铝合金轴心受压构件,均采用与 Perry 公式形式相同的设计公式^[1-3]

$$\phi_p = \left(\frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \right) \{ (1 + \eta + \bar{\lambda}^2) - [(1 + \eta + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2]^{1/2} \}, \quad (4)$$

$$\eta = \nu_0 / \rho. \quad (5)$$

式中: ϕ_p 为柏利公式推导的稳定系数; $\bar{\lambda}$ 为正则化长细比, $\bar{\lambda} = (\lambda / \pi) \sqrt{f_{0.2} / E}$; η 为相对初弯曲; ν_0 为初弯曲幅值,一般表示为长度的函数, $\nu_0 = L / m$, m 为系数,例如中国钢结构设计规范中 m 取 1 000; ρ 为截面核心距。由于相对初弯曲 η 一般表示为长度的函数,即与正则化长细比 $\bar{\lambda}$ 有关,为方便进一步分析,将相对初弯曲作如下变换

$$\eta = \frac{\nu_0}{\rho} = \frac{\bar{\lambda} i}{m \rho} \pi \sqrt{\frac{E}{f_{0.2}}}. \quad (6)$$

式中 i 为截面绕弯曲轴的回转半径。

令 $\alpha = i \pi \sqrt{E / f_{0.2}} / (m \rho)$, 即 $\eta = \alpha \bar{\lambda}$, 代入式(4)后得

$$\phi_p = \left(\frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \right) \{ (1 + \alpha \bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2) -$$

$$\left[(1 + \alpha \bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2)^2 - 4 \bar{\lambda}^2 \right]^{1/2} \}. \quad (7)$$

对式(7)和有限元模拟得到的稳定系数进行对比,见图 11.

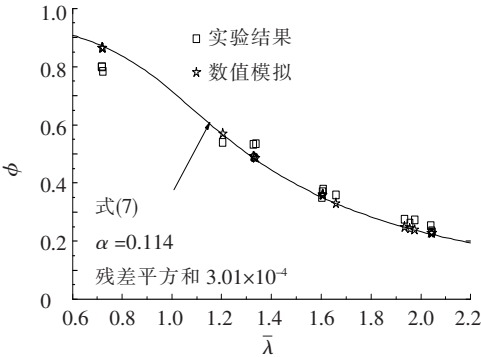


图 11 试验、数值模拟结果与式(7)比较

为进一步验证本文数值模拟结果与柏利公式的一致性以及了解初始弯曲对有限元结果的影响,对式(7)中参数 α 求偏导数, α 中包含了初始弯曲的因素,并引入参数 K , 得

$$K = \frac{\partial \phi_p}{\partial \alpha} = \frac{1}{2\bar{\lambda}} \left(1 - \frac{1 + \alpha \bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2}{\sqrt{(1 + \alpha \bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2)^2 - 4 \bar{\lambda}^2}} \right). \quad (8)$$

将式(8)用三维视图表示,见图 12,此时 $\alpha \in (0, 1]$, $\bar{\lambda} \in (0, 4]$, 即属于通常的初弯曲与正则化长细比范围内.当 $\alpha \rightarrow 0, \bar{\lambda} \rightarrow 1$ 时, K 的绝对值趋近于最大,即这种情况下利用柏利公式会得到最大的稳定系数.为验证数值模拟结果是否也存在此规律,对相同截面尺寸及不同长细比和初弯曲情况下的 H 型构件进行数值模拟,见图 13,图中曲线表明:对同一长细比构件,稳定系数随初弯曲幅值增大而减小;当 $\bar{\lambda}$ 接近 1 时,初弯曲幅值对稳定系数的影响更明显,例如当 $\bar{\lambda} = 1.188$ 时,稳定系数由 0.672 ($v_0 = L/8\,000$) 降低至 0.525 ($v_0 = L/500$),降低了 27.98%,因此初弯曲幅值对数值模拟结果的影响与理论推导类似.

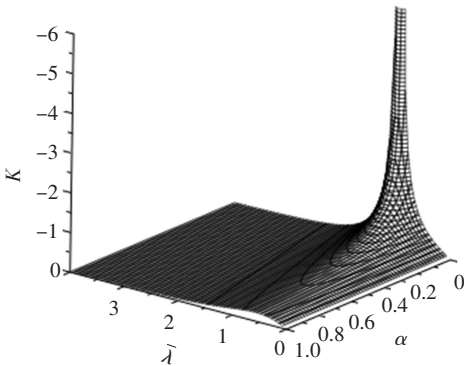


图 12 初弯曲大小对柏利公式的影响

3.4 材性参数 n 和 $f_{0.2}$

本文应力应变关系采用 Ramberg-Osgood 模型,如

式(1)所示,并通过材性试验确定了式(1)中高强铝合金 6082-T6 本构关系中的 3 个参数,即弹性模量 E 、名义屈服强度 $f_{0.2}$ 和指数 n .由于轴压试验构件的材料特性与材性试验试件之间存在差异,对本构关系中几个参数分别进行分析可以得到材料参数的影响规律,有利于分析误差产生的原因.从材性试验中了解到,构件的 E 一般比较稳定,因此材料的离散性主要反映在 n 与 $f_{0.2}$ 上.

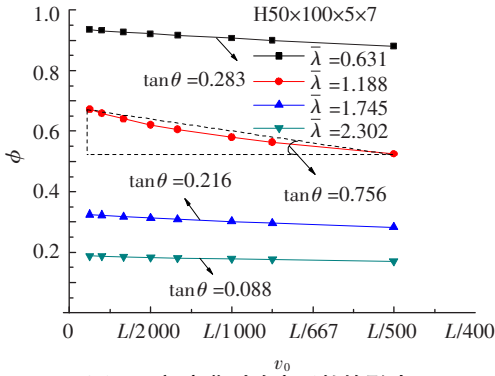


图 13 初弯曲对稳定系数的影响

首先考虑 $f_{0.2}$ 不变, n 值决定了图 14 中曲线的切线模量,当 n 值越大,本构关系模型越接近理想弹塑性,反之 n 值越小,本构关系模型越接近完全线弹性体,但同时弹性模量也大幅度降低.图 14 中,由于假定 $f_{0.2}$ 不变,应力应变曲线近似相交于应力值为 $f_{0.2}$ 处,各当应力小于 $f_{0.2}$ 时, n 值越大,同一应变所对应的应力越大,即构件达到相同变形所需施加的荷载越大.而构件弯曲失稳时,屈曲荷载所对应截面上的最大应力一般小于 $f_{0.2}$,因此对同一几何尺寸构件, n 值越大,屈曲荷载越大.同理,在荷载-位移曲线的下降区段, n 值越大,同一变形所对应的荷载越小,即荷载下降越快.本文进行了构件在通常的 n 值范围 ($n = 10 \sim 50$) 情况下的数值模拟,见图 15.对同一构件,随 n 值增大,稳定系数略有增加,当 $\bar{\lambda}$ 接近 1 时, n 值对稳定系数的影响更明显,例如当 $\bar{\lambda} = 1.188$ 时,稳定系数由 0.555 ($n = 10$) 提高到 0.586 ($n = 50$),增长了 5.51%.

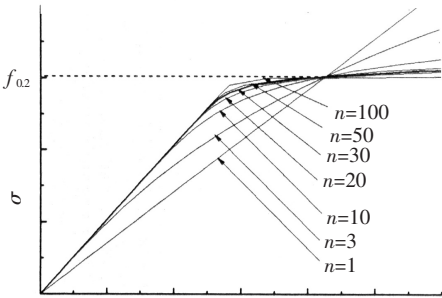


图 14 指数 n 值对应力应变曲线的影响

6082-T6 材料的 $f_{0.2}$ 一般为 270 ~ 350 MPa, 在弹性模量保持不变的情况下, $f_{0.2}$ 的增加意味着

本构曲线中弹性段的增长,见图 16.本文针对 4 种长细比构件在不同 $f_{0.2}$ 情况下进行数值模拟, $f_{0.2}$ 对屈曲荷载的影响见图 17,可以看到,对 λ 相同的构件,屈曲荷载随 $f_{0.2}$ 增大而增大,且屈曲荷载的增幅随 λ 的减小而增大,例如当 $\lambda = 108.82$ 时,屈曲荷载从 60.78 kN ($f_{0.2} = 270$) 提高到了 61.78 kN ($f_{0.2} = 350$),仅提高了 1.64%,而当 $\lambda = 29.84$ 时,屈曲荷载从 278.07 kN ($f_{0.2} = 270$) 提高到了 355.54 kN ($f_{0.2} = 350$),增长了 27.86%.

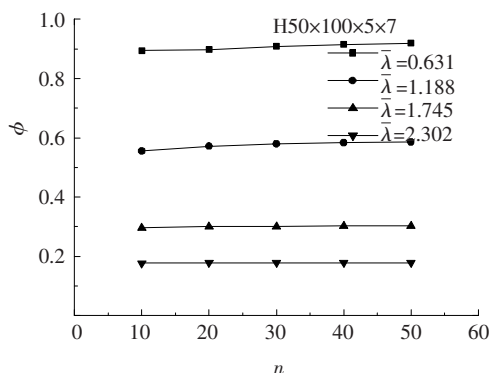


图 15 指数 n 对稳定系数的影响

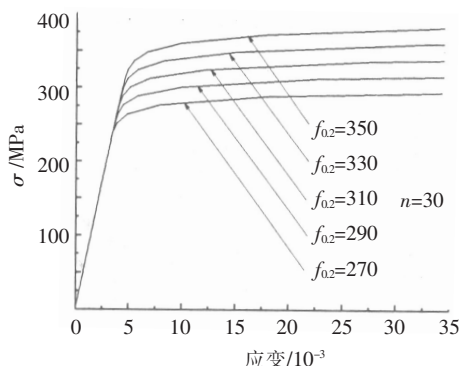


图 16 $f_{0.2}$ 对应力应变曲线的影响

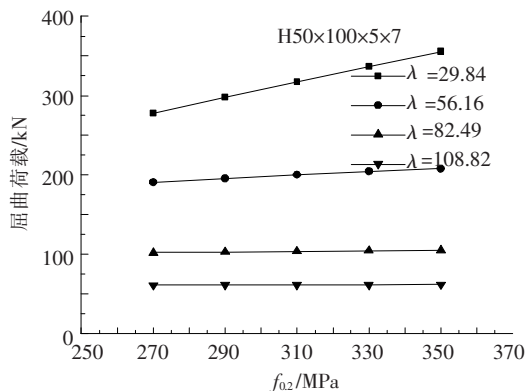


图 17 $f_{0.2}$ 对屈曲荷载的影响

4 结 论

1) 采用 3 维实体单元 C3D20 模拟两端单向铰支 H 型及箱型高强铝合金轴压构件,其有限元结果在构件变形曲线及屈曲荷载方面与试验实测

值吻合良好,最大误差控制在 12%.

2) 轴向网格尺寸和端板厚度对构件的稳定承载力结果影响很小,可忽略不计.

3) 试验时采用的钢板槽与石膏结合的单向铰支座方法能够保证试件接近理想铰支状态,不会带来较大误差.

4) 稳定系数随初弯曲幅值的增大而降低,当 $\bar{\lambda}$ 为 1.0 时,初弯曲对构件的稳定系数影响最大.

5) 随着 Ramberg-Osgood 模型中的材性参数 n 的增大,构件的稳定系数有所提高,且提高程度在 $\bar{\lambda}$ 为 1.0 时最为显著,约为 5.5%;随着 $f_{0.2}$ 的增大,构件的屈曲荷载也随之增大,且增幅在 λ 越小时越显著.

参考文献:

- [1] Eurocode 9: BS EN1999-1-1. Design of aluminum structures-general structure rules [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [2] The Aluminum Association. Specification for aluminum structures [S]. 6th ed. Washington D C: The Aluminum Association, 1994.
- [3] GB50429 铝合金结构设计规范 [S]. 北京:中华人民共和国建设部, 2007.
- [4] MAZZOLANI F M. Residual stress tests on French profiles 63×63×4 in aluminum alloys, Doc 16-74-3 [R]. Brussels: ECCS Committee, 1974.
- [5] MAZZOLANI F M. Residual stress tests alu-alloy Austrian profiles, Doc 16-75-1 [R]. Brussels: ECCS Committee, 1975.
- [6] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计 [M]. 2 版. 北京:科学出版社, 2003.
- [7] ABAQUS analysis user's manual: version 6.9.1 [M]. [S.I.]: ABAQUS Inc, 2009.
- [8] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters, NACA TN-902 [R]. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [9] STEINHARDT O. Aluminum constructions in civil engineering [J]. Aluminum, 1971, 47: 131-139.
- [10] 庄茁, 张帆, 岑松. ABAQUS 非线性有限元分析与实例 [M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [11] ZHAI Ximei, WANG Yujin, WU Hai, et al. Research on stability of high strength aluminum alloy columns loaded by axial compressive load [J]. Advanced Materials Research, 2011, 168/169/170: 1915-1920.
- [12] WALKER A C. Design and analysis of cold-formed sections [M]. New York: Wiley, 1975.

(编辑 赵丽莹)